

Informasi tambahan

untuk analisis CREA, “Tercekik lambatnya tindakan: Kebakaran hutan dan lahan di Indonesia sebabkan 1.700 kematian pada Agustus 2026 — namun polusi udara sehari-hari jauh lebih berbahaya”

Metodologi

Apa yang diperkirakan

Laporan ringkas ini mengestimasi jumlah kematian akibat **paparan jangka pendek** terhadap debu partikulat halus (PM2.5) ambien di Indonesia selama bulan Agustus 2026, yang dipisahkan menurut komponen karhutla dan non-karhutla di tingkat provinsi.

Data ini mencerminkan **kasus kematian akut**: fungsi konsentrasi-respons jangka pendek yang digunakan mencatat tingkat kematian yang terjadi dalam rentang jeda dua hingga tiga hari pasca paparan. Landasan perhitungannya mengacu pada kematian non-kecelakaan (alami), yaitu mengecualikan kematian akibat kecelakaan maupun tindak kekerasan.

Angka-angka ini tidak boleh disamakan dengan beban kesehatan kronis akibat asap kebakaran, dimana paparan musiman yang berulang diperkirakan memicu 33.000–44.000 kematian per tahun (Hein et al. 2022; Kiely et al. 2020). Hal ini berarti dalam jangka panjang, paparan polusi udara selama bulan Agustus akan berdampak pada jumlah kematian yang jauh lebih tinggi sebagai efek yang tertunda (delayed effect).

Pembedaan ini mengikuti konvensi yang ditetapkan oleh Johnston et al. (2012): penggunaan fungsi jangka pendek untuk mengukur paparan episodik, dan fungsi jangka panjang untuk paparan kronis.

Paparan

Kami menggunakan data PM2.5 permukaan harian dari produk global Tracking Air Pollution (TAP) dengan resolusi 0,1° (~11 km), yang merupakan gabungan dari pemantauan di darat, kedalaman optik aerosol satelit, dan pemodelan transportasi kimia (Geng et al. 2021). TAP menerbitkan total PM2.5 dan saluran karhutla lanskap dari analisis yang sama pada grid yang sama.

Setelah divalidasi terhadap monitor darat Indonesia, TAP memprediksi PM2.5 lebih rendah sekitar setengahnya di seluruh provinsi yang dilanda karhutla (median -53%). SILAM, model kimia-transport independen yang dibangun berdasarkan inventaris emisi karhutla yang berbeda, juga meleset ke arah yang sama dengan margin serupa (-61%).

Kami mengoreksi peta yang dipublikasikan menggunakan faktor perkalian yang disesuaikan dengan regresi tertimbang geografis pada 139 monitor kelas referensi di 97 kota, dengan bandwidth adaptif yang mencakup lima instrumen terdekat — dan taper yang mengembalikan bidang yang dipublikasikan di luar 250 km dari monitor manapun. Saluran karhutla dan non-karhutla disesuaikan secara terpisah, sehingga rasio karhutla/non-karhutla diukur dan bukan diwarisi dari TAP.

Permukaan konsentrasi yang telah dikoreksi kemudian dibobot dengan grid Gridded Population of the World v4.11 (tahun 2020, resolusi 1 km), dengan setiap provinsi diskalakan agar jumlahnya sesuai dengan estimasi penduduk pertengahan tahun 2025 dari Badan Pusat Statistik (BPS), yaitu 284 juta jiwa secara nasional.

Fungsi konsentrasi-respons

Partikel api karhutla dan partikel non-karhutla tidak diasumsikan memiliki tingkat toksisitas yang sama. Dua koefisien digunakan, masing-masing diterapkan pada metrik paparan yang digunakan untuk memperkirakannya.

Diterapkan pada	Hasil	RR untuk 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Metrik paparan	Sumber
Api karhutla (api)	Semua penyebab	1.017 (1.013–1.020)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen dkk. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
	Kardiovaskular	1.011 (1.005–1.017)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen dkk. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
	Pernapasan	1.016 (1.008–1.023)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen dkk. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
Non-karhutla (non-api)	Alami	1,0068 (1,0059–1,0077)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	WHO HRAPIE-2 (2025) / Liu dkk. (2019)
	Kardiovaskular	1,0055 (1,0045–1,0066)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	Liu dkk. (2019)
	Pernapasan	1,0074 (1,0053–1,0095)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	Liu dkk. (2019)

Perhitungan

Untuk setiap sel kisi g dan hari d :

- $E(g,d) = \beta_{\text{api}} \cdot MA_3(C_{\text{api}}) + \beta_{\text{non-api}} \cdot MA_2(C_{\text{non-api}})$
- $\beta = \ln(RR)/10$
- $AF(g,d) = 1 - \exp(-E(g,d))$

Fraksi yang dapat diatribusikan tertimbang populasi provinsi dan dikalikan dengan jumlah kematian dasar tahunan absolut provinsi tersebut:

- $Kematian(\text{prov},d) = AF_{\text{prov}}(d) \cdot Kematian\ Dasar(\text{prov}) / 365$

Angka kematian dasar

Angka kematian di tingkat provinsi diambil dari Studi Beban Penyakit Global 2023 (GBD 2025): jumlah kematian, semua umur, kedua jenis kelamin, subnasional Indonesia. Hasil utama adalah mortalitas alami (non-eksternal), dihitung sebagai semua penyebab dikurangi cedera, yang sesuai dengan apa yang diukur oleh fungsi konsentrasi-respons. Mortalitas pernapasan adalah gabungan dari penyakit pernapasan kronis dan infeksi saluran pernapasan bawah.

Perbandingan dengan penelitian sebelumnya

Crippa dkk. (2016) memperkirakan 11.880 kematian berlebih di seluruh Indonesia, Malaysia, dan Singapura selama September–Oktober 2015 — sekitar 195 per hari — menggunakan metode jangka pendek yang sama. Studi ini memberikan angka sekitar 120 per hari untuk Indonesia saja. Crippa mencakup puncak musim karhutla pada bulan September–Oktober, sedangkan studi ini mencakup bulan Agustus, dengan musim 2026 yang masih terus meningkat.

Pengakuan data

Data paparan dari produk global Tracking Air Pollution (TAP), Universitas Tsinghua, digunakan berdasarkan lisensi penelitian non-komersialnya. Data mortalitas dari Institut Metrik dan Evaluasi Kesehatan (GBD 2023). Pengukuran *ground measurements* diambil dari *air quality tracker* CREA Indonesia, yang mengkompilasi data dari 171 stasiun pemantau darat di Indonesia: jaringan nasional Kementerian Lingkungan Hidup (133), Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (26), serta Dinas Lingkungan Hidup Provinsi (12).

Referensi

Pusat Jaringan Informasi Ilmu Bumi Internasional (CIESIN), Universitas Columbia (2018). Populasi Dunia Berbasis Grid, Versi 4 (GPWv4.11): Jumlah Penduduk, Disesuaikan dengan UN WPP. NASA SEDAC.

Chen G, Guo Y, Yue X, dkk. (2021). Risiko kematian yang disebabkan oleh polusi PM_{2.5} akibat kebakaran hutan: studi deret waktu global di 749 lokasi. *The Lancet Planetary Health* 5:e579–e587.

Crippa P, Castruccio S, Archer-Nicholls S, dkk. (2016). Paparan populasi terhadap kualitas udara berbahaya akibat karhutla tahun 2015 di Asia Khatulistiwa. *Laporan Ilmiah* 6:37074.

Geng G, Xiao Q, Liu S, dkk. (2021). Melacak polusi udara di Tiongkok: pengambilan PM_{2.5} secara hampir real-time dari fusi data multisumber. *Environmental Science & Technology* 55:12106–12115.

GADM - Area Administratif Global (2022). Basis data GADM tentang Area Administratif Global, versi 4.1.

Jaringan Kolaborasi Beban Penyakit Global (2025). Hasil Studi Beban Penyakit Global 2023 (GBD 2023). Seattle: Institut Metrik dan Evaluasi Kesehatan (IHME). <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/> Disebutkan dalam teks sebagai GBD 2023.

Hein L, Spadaro JV, Ostro B, dkk. (2022). Dampak kesehatan akibat kebakaran lahan gambut di Indonesia. *Kesehatan Lingkungan* 21:62.

Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, dkk. (2012). Perkiraan angka kematian global yang disebabkan oleh asap dari kebakaran lahan. *Environmental Health Perspectives* 120:695–701.

Kiely L, Spracklen DV, Wiedinmyer C, dkk. (2019). Estimasi baru emisi partikulat dari kebakaran gambut di Indonesia pada tahun 2015. *Kimia dan Fisika Atmosfer* 19:11105–11121.

Kiely L, Spracklen DV, Wiedinmyer C, dkk. (2020). Kualitas udara dan dampak kesehatan dari kebakaran vegetasi dan lahan gambut di Asia Khatulistiwa selama tahun 2004–2015. *Environmental Research Letters* 15:094054.

Liu C, Chen R, Sera F, dkk. (2019). Polusi udara partikulat ambien dan mortalitas harian di 652 kota. *New England Journal of Medicine* 381:705–715.

Sofiev M, Vira J, Kouznetsov R, dkk. (2015). Konstruksi model dispersi atmosfer Eulerian SILAM berdasarkan algoritma adveksi Michael Galperin. *Pengembangan Model Geosains* 8:3497–3522.

Kantor Regional Organisasi Kesehatan Dunia untuk Eropa (2025). Risiko kesehatan akibat polusi udara di Eropa: Proyek HRAPIE-2 — panduan terbaru tentang fungsi konsentrasi-respons. Kopenhagen: WHO. Dikutip dalam teks sebagai WHO HRAPIE-2.

Lampiran

Propinsi	Meninggal	Api	Non-api	Bauran api	Per 100 ribu	Api per 100 ribu
Jawa Barat	518	38	480	7%	1.01	0,07
Jawa Tengah	421	41	380	10%	1.07	0,10
Jawa Timur	352	64	287	18%	0,82	0,15
Kalimantan Barat	334	331	4	99%	5,69	5,63
Sumatera Selatan	266	167	99	63%	3.02	1,90
Kalimantan Tengah	172	169	3	98%	6.00	5,90
Riau	154	121	34	78%	2.33	1,83
Sumatera Utara	151	41	110	27%	0,96	0,26
Jakarta	144	9	135	6%	1.29	0,08
Banten	139	9	130	7%	1.11	0,07
Kalimantan Selatan	137	128	10	93%	3.31	3.07
Lampung	132	47	85	36%	1.37	0,49
Sumatera Barat	112	93	19	83%	1,88	1.56
Jambi	92	67	26	72%	2,50	1.80
Sulawesi Selatan	81	16	65	20%	0,83	0,16
Kalimantan Timur	60	51	10	84%	1.48	1,25
Nusa Tenggara Barat	60	49	10	83%	1.07	0,89

Papua	56	47	8	85%	1.04	0,89
Yogyakarta	45	5	41	10%	1.17	0,12
Bali	43	36	7	85%	0,92	0,78
Aceh	41	6	35	15%	0,75	0,11
Bengkulu	39	15	25	37%	1,85	0,69
Nusa Tenggara Timur	36	20	16	56%	0,64	0,35
Kepulauan Riau	24	16	8	65%	0,99	0,65
Sulawesi Tengah	21	12	9	58%	0,67	0,39
Kepulauan Bangka-Belitung	19	11	8	57%	1.24	0,70
Maluku	16	13	2	85%	0,77	0,65
Sulawesi Tenggara	14	5	9	35%	0,51	0,18
Sulawesi Utara	14	8	5	62%	0,48	0,30
Sulawesi Barat	10	5	5	47%	0,68	0,32
Kalimantan Utara	10	7	2	74%	1.27	0,95
Papua Barat	9	8	2	84%	0,71	0,60
Maluku Utara	8	6	1	85%	0,55	0,46
Gorontalo	5	2	3	43%	0,43	0,18
INDONESIA	3.735	1.662	2.073	45%	1.30	0,58